ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА




УДК 519.693.54

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93

Математическое моделирование технологических процессов бетонирования монолитных конструкций из мелкозернистых смесей

Л.И. Касторных ✉, **М.А. Гикало** , **А.В. Каклюгин** , **И.А. Серебряная**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ likas9@mail.ru

Аннотация

Введение. Внедрение инновационных технологий и материалов в строительной отрасли сдерживается по ряду причин, связанных с недостаточной изученностью технологических процессов и повышенной стоимостью высокоэффективных инновационных материалов. Поэтому исследования в области технологии монолитного бетона, отражающие особенности бетонирования конструкций из самоуплотняющихся смесей и направленные на снижение их себестоимости за счет применения строительных отходов, являются актуальными. Целью настоящей работы является экспериментально-статистическое моделирование реологических характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей и физико-механических свойств бетонов в зависимости от влияния двух рецептурных факторов — расхода суперпластифицирующей добавки и гранулометрического состава заполнителя, включающего строительные отходы.

Материал и методы. Для приготовления мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей использовали портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н, песок природный кварцевый и песок из дроблёного бетона смеси трех фракций 0,63–5,0 мм и химическую добавку — суперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов Полипласт ПК. Технологические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся смесей (удобоукладываемость, вязкость, текучесть) определяли по стандартным методикам. Предельные напряжения сдвига смесей устанавливали с помощью прибора, включающего цилиндр с насадкой и стеклянное основание с разметкой окружностей. Моделирование реологических и физико-механических свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов осуществлялось с применением двухфакторного симплекс-суммированного плана на шестиугольнике, вписанном в окружность, являющегося одним из наиболее удобных для решения технологических задач строительного материаловедения.

Результаты исследования. Получены экспериментально-статистические модели реологических характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся смесей и прочностных свойств бетона, адекватно описывающие экспериментальные данные.

Обсуждение и заключение. Применение методов математического планирования эксперимента позволило комплексно оценить влияние двух наиболее значимых рецептурных факторов на технологические процессы бетонирования монолитных железобетонных конструкций из мелкозернистых самоуплотняющихся смесей с использованием заполнителя из строительных отходов. Установлено, что оптимальное содержание зерен из дробленого бетона в природном песке составляет 30–35 %, а дозировка суперпластификатора Полипласт ПК — 1,2–1,25 % массы вяжущего.

Ключевые слова: мелкозернистый самоуплотняющийся бетон, суперпластификатор на основе поликарбоксилатов, рециклинг строительных отходов, математическое планирование, экспериментально-статистические модели, регрессионный анализ

Для цитирования. Касторных Л.И., Гикало М.А., Каклюгин А.В., Серебряная И.А. Математическое моделирование технологических процессов бетонирования монолитных конструкций из мелкозернистых смесей. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):84–93. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93

Original article

Mathematical Modeling the Process of Concreting the Monolithic Structures Made of the Fine-Grained Mixes

Lyubov I. Kastornykh ✉, **Maksim A. Gikalo**, **Alexander V. Kaklyugin**, **Irina A. Serebryanaya**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ likas9@mail.ru

Abstract

Introduction. Implementation of the innovative technologies and materials into construction industry is constrained due to a number of reasons related to the insufficiently well studied production processes of the highly efficient innovative materials and their high cost. Therefore, studying the production process of the monolithic concrete structures, which is bearing the features of concreting the structures made of the self-compacting mixes and is targeting the prime cost reduction by using the construction waste, is relevant. The research aims at experimental and statistical modeling the dependence of the rheological properties of the fine-grained self-compacting concrete mixes and physical and mechanical properties of concretes on two recipe factors — consumption of superplastifying additive and grain-size composition of an aggregate containing the construction waste.

Materials and Methods. To prepare the fine-grained self-compacting concrete mixes, the Portland cement CEM 0 52,5N, natural quartz sand, crushed concrete sand mixed of three fractions 0.63–5.0 mm and a chemical additive — an ester-based polycarboxylate superplasticizer Polyplast PK, were used. The technological properties of the fine-grained self-compacting mixes (workability, viscosity, fluidity) were determined using the standard methods. The shear yield stress for the mixes was determined by means of an instrument consisting of a cylinder with a mouth and a glass base with marked circumferences. Modeling the rheological and physical-mechanical properties of the fine-grained self-compacting concretes was carried out based on the two-factor simplex sum mathematical planning visualised in a hexagon figure inscribed in a circle, which is one of the most appropriate methods of solving the technological problems in the construction materials science.

Results. The experimental-statistical models of the rheological properties of the fine-grained self-compacting mixes and strength properties of concrete were obtained, providing the adequate description of the experiment data.

Discussion and Conclusion. The mathematical planning used in the experiment made it possible to comprehensively assess the influence of two most significant recipe factors on the process of concreting the monolithic reinforced concrete structures made of fine-grained self-compacting mixes using the aggregate from the construction waste. It was determined that the optimal content of the crushed concrete grains in natural sand was 30–35 %, and proportion of the superplasticizer Polyplast PK was 1.2–1.25 % to the weight of binder.

Keywords: fine-grained self-compacting concrete, polycarboxylate superplasticizer, recycling of construction waste, mathematical planning, experimental-statistical models, regression analysis

For citation. Kastornykh LI, Gikalo MA, Kaklyugin AV, Serebryanaya IA. Mathematical Modeling the Process of Concreting the Monolithic Structures Made of the Fine-Grained Mixes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):84–93. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93

Введение. В строительном комплексе Российской Федерации для реализации проектов уникальных объектов и прежде всего высотного жилья из монолитного бетона востребованы нестандартные инновационные строительные технологии и материалы. Масштабное внедрение инновационных технологий и материалов в строительном производстве в настоящее время всё ещё сдерживается рядом ограничений [1]. Это связано с недостаточной изученностью технологических процессов, а также более высокой стоимостью новых материалов по сравнению с традиционно применяемыми.

Инновационные технологии в монолитном строительстве неразрывно связаны с бетононасосным принципом транспортирования и укладки самоуплотняющихся смесей. Применение такого технологического приема обеспечивает значительное сокращение сроков строительства рядовых объектов, а при возведении уникальных сооружений и высотных зданий часто является единственно возможным [2].

В ряде случаев, в частности для бетонирования густоармированных и тонкостенных конструкций, требуется использование мелкозернистых самоуплотняющихся смесей. В нормативной документации (ГОСТ 27006-2019 «Бетоны. Правила подбора состава», ГОСТ Р 59714-2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия», методическое пособие «Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов») проектирование составов самоуплотняющихся бетонов представлено общими положениями, а описание методики подбора составов мелкозернистых самоуплотняющихся смесей отсутствует. Сырьевая база мелкого заполнителя Ростовской области представлена песками, относящимися по зерновому составу к мелким и очень мелким. Использовать местные пески для бетонирования многих конструкций, а особенно высокопрочных, недопустимо. В таких случаях необходимо улучшать гранулометрию заполнителя, обогащая его более крупными зернами размерами от 1,25 до 5,0 мм. В практических условиях мелкие пески обогащают, используя отсевы камнедробления. Альтернативой природным материалам могут быть мелкие заполнители, получаемые дроблением строительных отходов. Рециклинг заполнителей из дробленого бетона, обоснованный ГОСТ 32495-2013 «Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона», является решением актуальной экологической задачи, связанной с большим количеством накопленных строительных отходов [3, 4].

Выполненные исследования в области самоуплотняющихся смесей с техногенными отходами показали, что свойствами самоуплотнения могут обладать смеси, получаемые при использовании суперпластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов или полиарилов [5, 6]. Такие химические модификаторы, весьма чувствительные к минералогическому составу вяжущего и другим тонкодисперсным минеральным компонентам смеси, принимают участие в формировании структуры и свойств цементного камня [7, 8]. Поэтому в производственных условиях выпуску самоуплотняющихся смесей должны предшествовать исследования о совместимости суперпластификаторов с материалами, используемыми для приготовления бетона [9–11].

На технологические характеристики самоуплотняющихся смесей и физико-механические показатели бетона оказывает влияние множество факторов, которые необходимо оптимизировать на стадии проектирования состава бетона и разработки проекта производства работ [12, 13]. При подборе состава бетонной смеси с использованием дробленых зерен из строительных отходов и высокоэффективных суперпластификаторов и назначении технологических параметров бетонирования монолитных конструкций требуется научное сопровождение [14, 15]. Поэтому целью настоящей работы явилась оценка и анализ влияния зернового состава заполнителя и поликарбоксилатного суперпластификатора на реологические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся смесей и физико-механические свойства бетона на основе методов математического планирования эксперимента.

Материалы и методы. В исследованиях для определения рациональной дозировки химического модификатора применяли добавку Полипласт ПК — универсальный суперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов для товарного бетона и сборных железобетонных конструкций, используемый по рекомендациям производителя для регулирования сохраняемости бетонных смесей при одновременном быстром наборе ранней прочности бетона.

Для приготовления мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей использовали бездобавочный портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»:

– прочность на сжатие в возрасте 28 сут. — 63,3 МПа;
– прочность на сжатие после тепловой обработки — 48,2 МПа;
– нормальная густота цементного теста — 27,8 %;
– удельная поверхность — 382,5 м^2/кг.

Минералогический состав портландцемента приведен в таблице 1.

Таблица 1

Минералогический состав портландцемента

Тип и класс цемента	Состав, %						
	C3S	C2S	C3A	C4AF	SO3	MgO	R2O
ЦЕМ 0 52,5Н	60,9	11,9	7,1	12,1	3,01	1,07	0,84

В составе мелкого заполнителя использовали:

– песок природный кварцевый, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ»: истинная плотность 2650 кг/м^3, насыпная плотность 1410 кг/м^3, модуль крупности 1,15 (группа — очень мелкий), пустотность 46,6 %;

– песок из дроблёного бетона, соответствующий требованиям ГОСТ 32495-2013, смеси трех фракций: 0,63–1,25 мм, 1,25–2,5 мм, 2,5–5,0 мм в соотношении по массе 20:30:50 соответственно.

Технологические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей — удобоукладываемость, текучесть, вязкость — определяли по методикам ГОСТ Р 59715-2022 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний».

Вязкость смеси t500 устанавливали, фиксируя время, за которое растекающаяся смесь впервые коснется отметки 500-миллиметровой окружности. Текучесть смеси Т определяли методом блокировочного кольца с 12 арматурными стержнями.

Для определения устойчивости смеси к расслаиванию применяли визуальный метод определения стабильности смеси по ГОСТ Р 59715-2022.

Реологическую характеристику смеси — предельные напряжения сдвига — определяли с помощью прибора, включающего цилиндр с насадкой и стеклянное основание с разметкой окружностей (рис. 1).



Рис. 1. Прибор для определения предельного напряжения сдвига бетонной смеси

Расчет предельных напряжений сдвига бетонных смесей τ_o, Н/м^2, выполняли по формуле, апробированной исследователями [16]:

$$\tau_o = \left(\frac{h \times d^2}{k \times D^2}\right) \times \rho,$$

где *h, d* — высота и диаметр, м, соответственно цилиндра; ρ — средняя плотность бетонной смеси, кг/м^3; *D* — диаметр расплыва бетонной смеси, м; *k* = 2 (по [16]).

Из смеси каждого состава готовили контрольные образцы-кубы с номинальным размером ребра 100 мм. Хранение и испытание образцов бетона выполняли по методике ГОСТ 10180.

Для оценки реологических и физико-механических свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов (МСУБ) реализован эксперимент, квадратичная модель которого имеет вид:

$$Y_i = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + b_{11} \times x_1^2 + b_{22} \times x_2^2 + b_{12} \times x_1 \times x_2,$$

где Y_i — исследуемое свойство; x_1, x_2 — варьируемые факторы; b_0, b_1, b_2 ,b_{11}, b_{22}, b_{12} — коэффициенты регрессии.

Для получения квадратичной модели принят двухфакторный симплекс-суммированный план на шестиугольнике, вписанном в окружность, который является одним из наиболее удобных при решении ряда рецептурных и технологических задач строительного материаловедения [17].

Результаты исследования. В качестве факторов, в наибольшей степени влияющих на реологические и физико-механические свойства МСУБ, приняты:

– X_1 — содержание зерен дробленого бетона в природном мелком заполнителе;

– X_2 — дозировка суперпластификатора Полипласт ПК.

Условия проведения эксперимента — исследованные факторы и интервалы их варьирования — представлены в таблице 2, а план эксперимента и натуральные значения переменных в каждой точке плана — в таблице 3.

Таблица 2

Исследуемые факторы и интервалы их варьирования

Код	Значение кода	Исследуемые факторы	
		X_1	X_2
Основной уровень X_{i0}	0	30	1,0
Интервал варьирования ΔX_i	x	10	0,5
Верхний уровень $X_{i\,max}$	+1	40	1,5
Нижний уровень $X_{i\,min}$	–1	20	0,5

Таблица 3

План эксперимента и натуральные значения переменных

Точка плана	План			
	в кодированном выражении		в натуральном выражении	
	X_1	X_2	x_1 содержание зерен дробленого бетона в природном песке, %	x_2 дозировка суперпластификатора Полипласт ПК, %
1	–1	0	20	1,0
2	+1	0	40	1,0
3	+0,5	+0,87	35	1,435
4	+0,5	–0,87	35	0,565
5	–0,5	+0,87	25	1,435
6	–0,5	–0,87	25	0,565
7	0	0	30	1,0

Для соблюдения условий сопоставимости эксперимента стабилизированы следующие факторы:

– расход цемента (Ц ~ 510 кг/м^3);

– растекаемость смесей (готовили мелкозернистые самоуплотняющиеся смеси марки по удобоукладываемости РК1 по ГОСТ Р 59714-2021).

В качестве откликов приняты реологические характеристики смесей и прочностные свойства бетонов:

– Y_1 — вязкость смеси t500, с;

– Y_2 — текучесть смеси с блокирующим кольцом Т, мм;

– Y_3 — предельные напряжения сдвига смеси τ_o, Н/м^2;

– Y_4 — предел прочности бетона при сжатии в возрасте 1 сут. R1, МПа;

– Y_5 — предел прочности бетона при сжатии в возрасте 28 сут. R28, МПа.

Для экспериментальных исследований готовили мелкозернистые самоуплотняющиеся смеси, показатели конструктивности и визуальное описание которых представлены в таблице 4.

Таблица 4

Показатели конструктивности и характеристики мелкозернистых смесей

Точка плана	Расход материалов на 1 м^3, кг			В/Ц	Средняя плотность смеси, кг/м^3	Визуальная оценка смеси
	Песок природный	Песок дробленый	Добавка			
1	1093	274	5,1	0,49	2128	Стабильная, но быстро загустевает
2	855	570	5,3	0,47	2208	Нестабильная с заметным водоотделением
3	933	502	7,6	0,45	2215	Стабильная, незначительное отделение цементного теста
4	907	488	2,95	0,54	2195	Стабильная, но сразу растекается
5	1052	351	7,4	0,49	2185	Стабильная, незначительное отделение цементного теста
6	960	319	2,7	0,69	2082	Стабильная, но сразу растекается
7	965	414	5,1	0,49	2145	Стабильная с вязким течением

В процессе визуального наблюдения за характером растекаемости смеси при определении расплыва нормального конуса установлено значительное влияние исследуемых факторов на стабильность смеси.

Рассчитанные методом наименьших квадратов значимые коэффициенты регрессии полученных экспериментально-статистических моделей (ЭС-моделей) вышеперечисленных свойств смеси и МСУБ приведены в таблице 5.

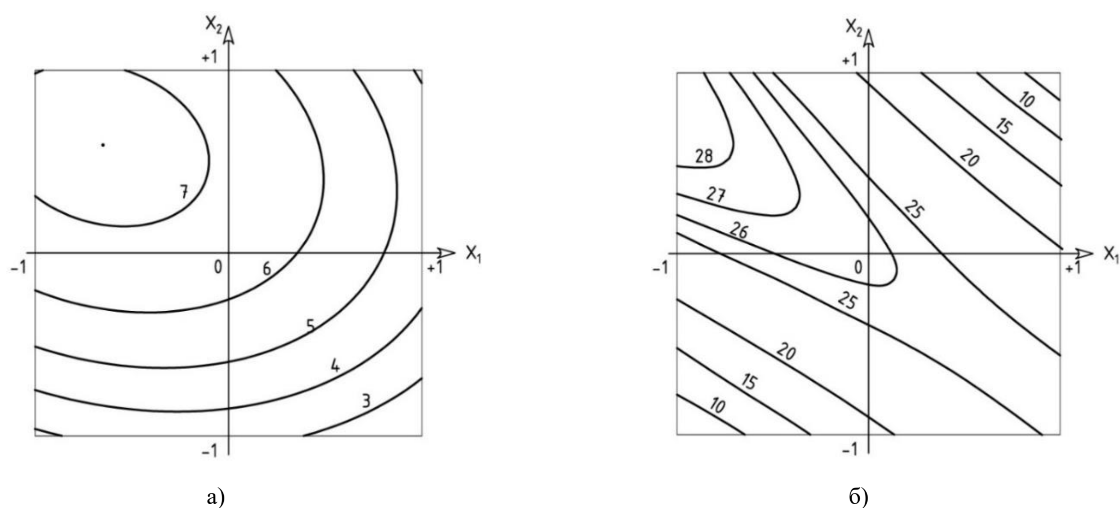
Таблица 5

ЭС-модели реологических и прочностных свойств МСУБ

Исследуемое свойство	Коэффициенты регрессии					
	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
Y_1 — вязкость смеси t500, с	6,500	–1,033	1,552	–1,033	–1,612	–0,568
Y_2 — текучесть смеси с блокирующим кольцом T, мм	26,222	–1,500	0,287	–4,056	–7,401	–12,311
Y_3 — предельные напряжения сдвига смеси τ_o, Н/м^2	261,444	–18,222	–30,077	–65,444	–36,952	–60,227
Y_4 — прочность бетона при сжатии в возрасте 1 сут. R1, МПа	21,400	0,678	1,494	–3,083	–8,130	–3,902
Y_5 — прочность бетона при сжатии в возрасте 28 сут. R28, МПа	52,042	4,829	6,961	–3,304	–8,154	–0,582

Проверку адекватности полиномиальных уравнений второго порядка производили по критерию Фишера $F_{экс}$. При выполнении условия $F_{экс.} < F_{табл.}$ уравнение признается адекватным и возможным для получения расчётных значений функций отклика Y.

Графическая интерпретация полученных ЭС-моделей представлена в виде изолиний, построенных по оригинальной программе [18]. Изолинии реологических характеристик смесей в зависимости от исследуемых факторов представлены на рис. 2 и 3.



а) б)

Рис. 2. Изолинии вязкости и текучести мелкозернистых самоуплотняющихся смесей в зависимости от содержания дробленых зерен и дозировки суперпластификатора: а — вязкость, с; б — текучесть, мм

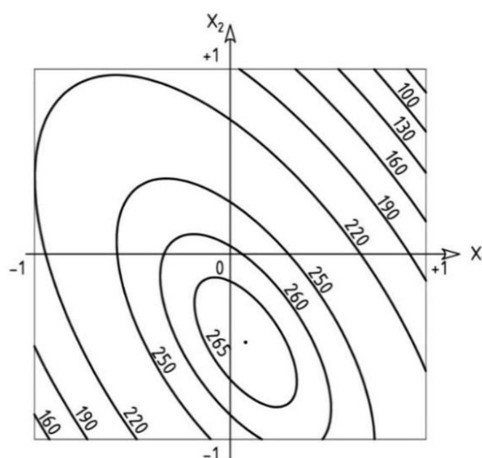


Рис. 3. Изолинии предельных напряжений сдвига, Н/м^2, мелкозернистых смесей в зависимости от содержания дробленых зерен и дозировки суперпластификатора

Строительные материалы и изделия

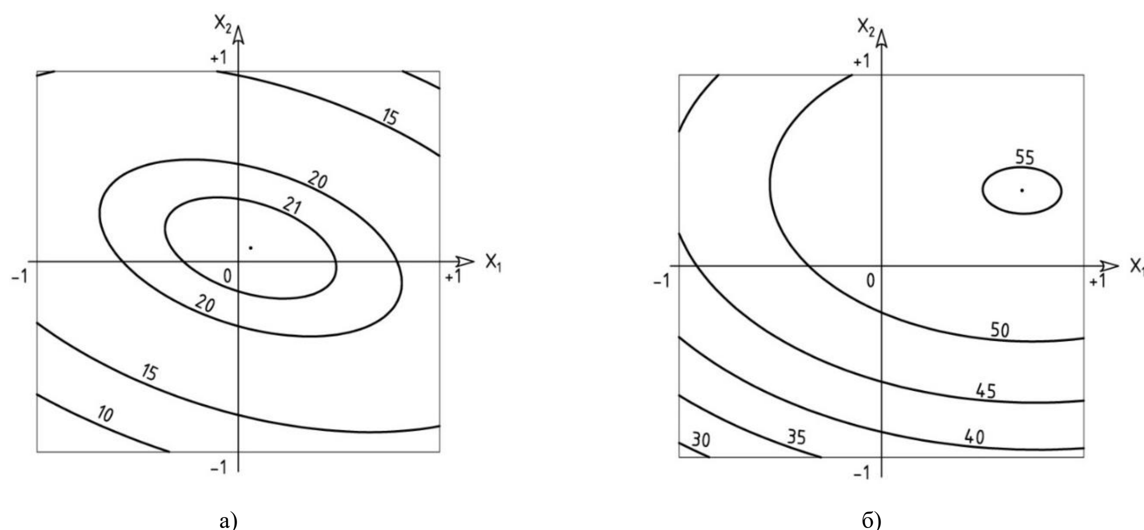
Анализ полученных моделей реологических свойств мелкозернистых смесей показывает, что влияние исследуемых факторов носит нелинейный характер. На вязкость t500, которая характеризует связное течение смеси и, по мнению авторов, должна находиться в пределах 5–6 с, большее влияние оказывает дозировка суперпластификатора. Получение стабильных нерасслаивающихся смесей требует оптимизации расхода химического модификатора.

Показатель текучести смеси *T*, который должен иметь минимальное значение, в большей степени зависит от содержания дробленых зерен в природном песке. Увеличение количества крупных зерен в мелком заполнителе при оптимальном расходе суперпластификатора способствует снижению показателя текучести мелкозернистой смеси.

Минимальная величина предельных напряжений сдвига τ_o, свидетельствующая о способности смеси перекачиваться по бетоноводам с минимальными энергозатратами, достигается при определенных значениях исследуемых параметров (рис. 3). Для полученной ЭС-модели с учетом визуальных наблюдений стабильности смесей она получается при содержании 35–37 % дробленых зерен в природном песке и расходе суперпластификатора 1,2–1,25 % массы вяжущего.

Совместная оценка ЭС-моделей реологических свойств МСУБ с визуальными наблюдениями (таблица 4) показала, что для обеспечения связности и стабильности смесей оптимальное содержание зерен дробленого бетона в природном заполнителе должно быть в пределах 30–35 % при дозировке суперпластификатора Полипласт ПК 1,2–1,25 % массы цемента.

Графическая интерпретация ЭС-моделей прочности МСУБ в раннем (1 сут.) и проектном возрасте (28 сут.) в зависимости от исследуемых факторов представлена на рис. 4. Анализ ЭС-моделей прочностных характеристик МСУБ также показал нелинейный характер влияния факторов эксперимента. Для достижения максимальной прочности бетона в раннем возрасте *R*1 варьируемые факторы должны находиться на среднем уровне: при содержании дробленых зерен в природном песке 30 % и расходе суперпластификатора 1,0 % массы цемента.



а) б)

Рис. 4. Изолинии прочности МСУБ, МПа, в зависимости от содержания дробленых зерен и дозировки суперпластификатора: а — в раннем возрасте; б — проектном возрасте

Увеличение расхода суперпластификатора на поликарбоксилатной основе приводит к заметному торможению процессов гидратации цемента и замедлению набора прочности бетона на ранней стадии.

В проектном возрасте максимальная прочность МСУБ R28 достигается при увеличении содержания зерен дробленого бетона в природном заполнителе до 35–37 % и дозировке суперпластификатора Полипласт ПК 1,2–1,25 % массы вяжущего.

Обсуждение и заключение. Реализация эксперимента подтвердила, что проектирование составов мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с суперпластификатором на поликарбоксилатной основе и заполнителем, содержащим строительные отходы, требует научного сопровождения. Применение методов математического планирования позволило комплексно оценить влияние рецептурных факторов на технологические процессы бетонирования конструкций из мелкозернистых самоуплотняющихся смесей.

Установлено, что совместный анализ визуального наблюдения и ЭС-моделей реологических характеристик самоуплотняющихся смесей позволяет комплексно оценить влияние исследуемых факторов и определить их рациональную дозировку при проектировании состава бетонных смесей.

Выявлено, что реологические показатели самоуплотняющихся смесей, обладающих связностью и стабильностью, в большей степени зависят от расхода суперпластификатора, а на прочностные характеристики МСУБ большее влияние оказывает содержание зерен из дробленого бетона в природном мелком заполнителе. Установлено, что оптимальное содержание дробленых зерен в природном песке составляет 30–35 %, а дозировка суперпластификатора Полипласт ПК — 1,2–1,25 % массы вяжущего.

Математическое моделирование технологических процессов приготовления, транспортирования и укладки самоуплотняющихся бетонных смесей делает их привлекательными для инвесторов и создает условия для активного внедрения инноваций в монолитном строительстве.

Список литературы

1. Васильева Е.Ю. Значение и перспективы применения инновационных материалов и технологий в жилищном строительстве. *Вестник МГСУ.* 2022;17(11):1586–1593. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.11.1586-1593

2. Османов С.Г., Манойленко А.Ю., Литовка В.В. Выбор вариантов механизации бетонных работ в монолитно-каркасном строительстве. *Инженерный вестник Дона.* 2019;1. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5507 (дата обращения: 02.07.2023).

3. Lopatin N.A., Motornaja A.I., Neguliaeva E.Yu. The Most Effective Crushing Equipment and Testing of Recycled Concrete Aggregates. *Construction of Unique Buildings and Structures.* 2015;10:34–45. https://doi.org/10.18720/CUBS.37.3

4. Гранева А.В. Применение рециклинга в процессе переработки бетона и железобетона. *Инженерный вестник Дона.* 2023;(3). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8286 (дата обращения: 21.07.2023).

5. Булдыжов А.А., Алимов Л.А. Самоуплотняющиеся бетоны с наномодификаторами на основе техногенных отходов. *Промышленное и гражданское строительство.* 2014;8:86–88.

6. Ларсен О.А., Наруть В.В., Воронин В.В. Технология переработки бетонного лома с целью получения самоуплотняющегося бетона. *Строительство и реконструкция.* 2020;(2):61–66. https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-61-66

7. Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Orlov A.A. Influence of Superplasticizer-Microsilica Complex on Cement Hydration, Structure and Properties of Cement Stone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2017;262:012028. https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012028

8. Kong F.R., Pan L.S., Wang C.M., Zhang D.L., Xu N. Effect of Polycarboxylate Superplasticizers with Different Molecular Structure on the Hydration Behavior of Cement Paste. *Construction and Building Materials.* 2016;105:545–553. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.178

9. Smirnova O.M. Compatibility of Portland Cement and Polycarboxylate-Based Superplasticizers in High-Strength Concrete for Precast Constructions. *Magazine of Civil Engineering*. 2016;6:12–22. https://doi.org/10.5862/MCE.66.2

10. Lange A., Plank J. Formation of Nano-Sized Ettringite Crystals Identified as Root Cause for Cement Incompatibility of PCE Superplasticizers. In: *Nanotechnology in Construction: Proceedings of NICOM5.* Sobolev K., Shah S. (eds.). Cham: Springer; 2015. P. 55–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17088-6_6

11. Nesvetaev G., Koryanova Yu., Korchagin I. To the Problem of the Methodology for Evaluating the Effectiveness of the Use of Superplasticizers in Concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;709:044056. https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044056

12. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Некоторые вопросы технологии бетонирования массивных фундаментных плит с применением самоуплотняющихся бетонных смесей. *Инженерный вестник Дона.* 2022;8. URL: http://wmv.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7870 (дата обращения: 08.08.2023).

13. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Чепурненко А.С., Сухин Д.П. О влиянии некоторых технологических факторов на качество бетона монолитных железобетонных конструкций. *Инженерный вестник Дона.* 2021;11. URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7256 (дата обращения: 12.07.2023).

14. Kastornykh L., Kaklyugin A., Kholodnyak M., Osipchuk I. Modified Concrete Mixes for Monolithic Construction. *Materials Science Forum.* 2021;1043:81–91. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.81

15. Касторных Л.И., Каклюгин А.В., Гикало М.А. Влияние суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов на эффективность термообработки монолитного бетона. *Строительные материалы.* 2023;4:35–41. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-35-41

16. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. *Модифицированные высококачественные бетоны*. Москва: Издательство АСВ; 2006. 368 с.

17. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. *Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ*. Киев: Выща школа; 1989. 324 с.

18. Роговенко Т.Н., Каклюгин А.В. *Izoline2015*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2015614784. 2015.

References

1. Vasilyeva EYu. Innovative Materials and Technologies in Housing Construction: Importance and Prospects. *Vestnik MGSU*. 2022;17(11):1586–1593. (In Russ.). https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.11.1586-1593

2. Osmanov SG, Manoilenko AY, Litovka VV. Selection of the Mechanization Variants of Concrete Works in Monolithic Frame Construction. *Engineering Journal of Don*. (In Russ.). 2019;(1). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5507 (accessed: 02.07.2023).

3. Lopatin N.A., Motornaja A.I., Neguliaeva E.Yu. The Most Effective Crushing Equipment and Testing of Recycled Concrete Aggregates. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015;10:34–45. https://doi.org/10.18720/CUBS.37.3

4. Graneva AV. The Application of Recycling in the Concrete and Reinforced Concrete Recycling Process. *Engineering Journal of Don*. 2023;(3). (In Russ.). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8286 (accessed: 21.07.2023).

5. Buldyzhov AA, Alimov LA. Self-Compacting Concretes with Nanomodifiers on the Basis of Industrial Waste. *Industrial and Civil Engineering*. 2014;8:86–88. (In Russ.).

6. Larsen OA, Naruts VV, Voronin VV. Concrete Recycling Technology for Self-compacting Concrete. *Building and Reconstruction*. 2020;(2):61–66. (In Russ.). https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-61-66

7. Ivanov IM, Kramar LYa, Orlov AA. Influence of Superplasticizer-Microsilica Complex on Cement Hydration, Structure and Properties of Cement Stone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;262:012028. https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012028

8. Kong FR, Pan LS, Wang CM, Zhang DL, Xu N. Effect of Polycarboxylate Superplasticizers with Different Molecular Structure on the Hydration Behavior of Cement Paste. *Construction and Building Materials*. 2016;105:545–553. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.178

9. Smirnova OM. Compatibility of Portland Cement and Polycarboxylate-Based Superplasticizers in High-Strength Concrete for Precast Constructions. *Magazine of Civil Engineering*. 2016;6:12–22. https://doi.org/10.5862/MCE.66.2

10. Lange A, Plank J. Formation of Nano-Sized Ettringite Crystals Identified as Root Cause for Cement Incompatibility of PCE Superplasticizers. In: *Nanotechnology in Construction: Proceedings of NICOM5*. Sobolev K, Shah S (eds.). Cham: Springer; 2015. P. 55–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17088-6_6

11. Nesvetaev G, Koryanova Yu, Korchagin I. To the Problem of the Methodology for Evaluating the Effectiveness of the Use of Superplasticizers in Concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;709:044056. https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044056

12. Nesvetaev GV, Koryanova YI, Sukhin DP. Some Questions of the Technology of Concreting Massive Foundation Slabs Using Self-Compacting Concrete Mixtures. *Engineering Journal of Don*. 2022;(8):327-345. (In Russ.). URL: http://wmv.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7870 (accessed: 08.08.2023).

13. Nesvetaev GV, Koryanova YI, Chepurnenko AS, Sukhin DP. On the Influence of Some Technological Factors on the Quality of Concrete of Monolithic Reinforced Concrete Structures. *Engineering Journal of Don*. 2021;(11). (In Russ.). URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7256 (accessed: 12.07.2023).

14. Kastornykh L, Kaklyugin A, Kholodnyak M, Osipchuk I. Modified Concrete Mixes for Monolithic Construction. *Materials Science Forum*. 2021;1043:81–91. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.81

15. Kastornykh LI, Kaklyugin AV, Gikalo MA. The Effect of Polycarboxylate-Based Superplasticizers on the Efficiency of Heat Treatment of Monolithic *Concrete. Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. 2023;4:35-41. (In Russ.). https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-35-41

16. Bazhenov YuM, Dem'yanova VS, Kalashnikov VI. *Modified High-Quality Concretes*. Moscow: Publishing House ASV; 2006. 368 p. (In Russ.).

17. Voznesenskij VA, Lyashenko TV, Ogarkov BL. *Numerical Methods for Solving Construction and Technological Problems with Computers*. Kiev: Vyshcha shkola; 1989. 324 p. (In Russ.).

18. Rogovenko TN, Kaklyugin AV. *Izoline2015*. Certificate of State Registration of the Computer Program, № 2015614784. 2015. (In Russ.).

Поступила в редакцию 14.09.2023
Поступила после рецензирования 01.10.2023
Принята к публикации 16.10.2023

Об авторах:

Касторных Любовь Ивановна, доцент кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, likas9@mail.ru

Гикало Максим Алексеевич, магистрант кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, gikalo_max@mail.ru

Каклюгин Александр Викторович, доцент кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, kaklugin@gmail.com

Серебряная Ирина Анатольевна, доцент кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, silveririna@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Касторных Л.И. — разработка плана и проведение экспериментальных работ.

Гикало М.А. — проведение экспериментов, подготовка иллюстраций.

Каклюгин А.В. — программная реализация и статистическая обработка экспериментальных данных.

Серебряная И.А. — статистическая обработка экспериментальных данных.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 14.09.2023
Revised 03.10.2023
Accepted 16.10.2023

About the Authors:

Lyubov I. Kastornykh, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Process Engineering and Assessment in Construction Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, likas9@mail.ru

Maksim A. Gikalo, Master's student of the Process Engineering and Assessment in Construction Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, gikalo_max@mail.ru

Alexander V. Kaklyugin, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Construction Materials Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, kaklugin@gmail.com

Irina A. Serebryanaya, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Process Engineering and Assessment in Construction Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, silveririna@mail.ru

Claimed contributorship:

Kastornykh LI — development of a plan and carrying out works in the frame of the experiment.

Gikalo MA — conducting the experiments, preparing the illustrations.

Kaklyugin AV — software implementation and statistical processing the experiment data.

Serebryanaya IA — statistical processing of experiment data.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.